

## О НОВОМ ДЛИТЕЛЬНОМ МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ю. И. Стожков<sup>1</sup>, В. П. Охлопков<sup>2</sup>

*Текущий 24-й цикл солнечной активности, который начался в 2008 г. и продолжается по настоящее время, является аномальным по сравнению с предшествующими циклами. Его необычные свойства включают в себя низкое число солнечных пятен  $R_z$  в течение длительного времени, слабое межпланетное магнитное поле, слабое полярное фотосферное поле на Солнце и др. Начиная с 1000 г. по настоящее время имели место 5 длительных минимумов солнечной активности. Эти минимумы происходили в периоды времени, когда расстояние между центром масс солнечной системы и центром Солнца несколько раз изменялось от максимальных до минимальных значений за время 40–70 лет. С начала нового тысячелетия начался именно такой период, и можно полагать, что мы вступили в новый длительный минимум, который будет продолжаться несколько десятилетий. В текущем 24-ом и последующих 2–3 циклах солнечной активности среднегодовые значения числа солнечных пятен будут низкими,  $R_{z\max} \leq (50 - 70)$ .*

**Ключевые слова:** солнечная активность, солнечные пятна, прогноз солнечной активности.

*Введение.* Одной из важных характеристик солнечной активности является существование  $\sim 11$ -летнего цикла в числе солнечных пятен или их групп, в потоке солнечного радиоизлучения на длине волны  $\lambda = 10.8$  см, и в ряде других параметров солнечной активности. В данной работе мы будем анализировать число солнечных пятен  $R_z$  (число

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: stozhkov@fian.fiandns.mipt.ru.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Вольфа) или их групп  $\eta$ . В течение  $\sim 11$ -летнего цикла число пятен на Солнце меняется от почти полного их отсутствия в начале цикла до максимальной величины в середине цикла, которая в конце цикла опять уменьшается до минимума. В качестве примера на рис. 1 показаны среднегодовые значения чисел Вольфа  $R_z$  за последние  $\sim 400$  лет [1, 2]. Видно, что более 300 лет на Солнце наблюдалась  $\sim 11$ -летняя цикличность в изменении  $R_z$ . Если использовать ряд Шове, который восстанавливает уровень солнечной активности более чем за 2500-летний период, то эта цикличность имела место и в далеком прошлом [3]. Однако в период с 1645 г. по 1715 г. цикличность нарушилась, и пятна на Солнце практически не наблюдались в течение почти 70 лет. Возможно, что  $\sim 11$ -летний цикл существовал, но его амплитуда была очень низкой и пятна наблюдались в очень небольшом количестве. Этот период называется Маундеровским минимумом солнечной активности [4]. Низкие значения  $R_z$  наблюдались в минимуме Дальтона (1790–1835 гг.). Начиная с 1000 г. по настоящее время, выявлены 5 продолжительных минимумов солнечной активности с низким числом солнечных пятен (см. табл. 1) [4]. Причина появления продолжительных минимумов солнечной активности неизвестна.

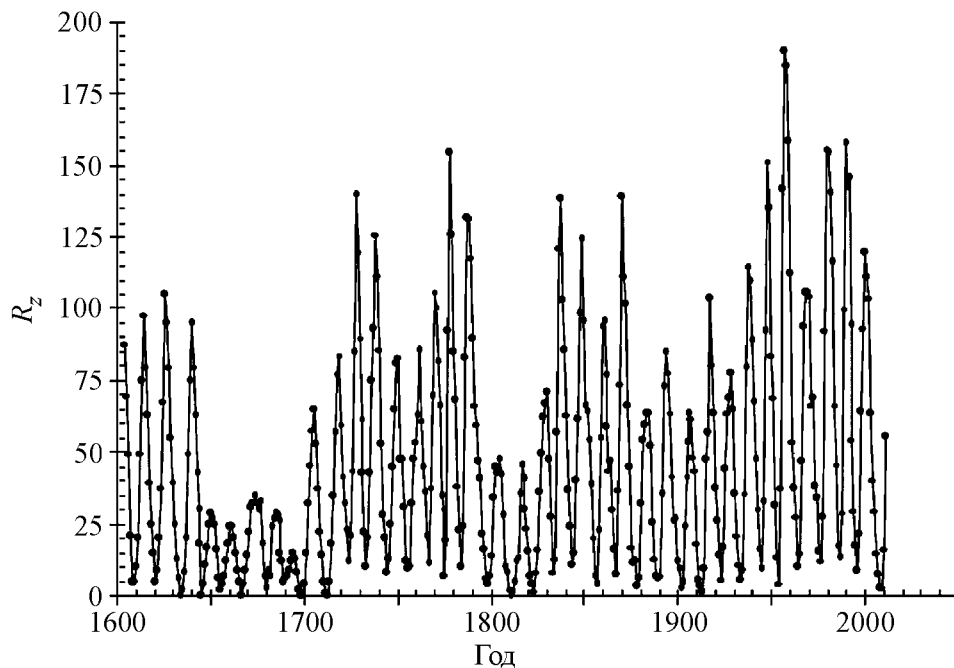


Рис. 1: Временной ход среднегодовых значений числа солнечных пятен  $R_z$  с 1610 г. по 2011 г. [1, 2]. Значительное уменьшение  $R_z$  наблюдается в период Маундеровского минимума (1645–1715 гг.) и минимума Дальтона (1790–1835 гг.).

Т а б л и ц а 1

*Длительные минимумы солнечной активности [4]*

Название минимума	Период минимума (годы)
минимум Оорта (O)	~1050
минимум Вольфа (W)	1280–1340
минимум Шперера (S)	1420–1530
минимум Маундера (M)	1645–1715
минимум Дальтона (D)	1790–1835
новый минимум (N)	2005–(2040?)

С большой степенью вероятности в последние годы мы вступили в период нового длительного минимума солнечной активности [5]. Основанием для такого вывода является и существование корреляционной связи длительных аномально низких уровней солнечной активности (числа солнечных пятен  $R_z$ ) с экстремальными значениями расстояний между центром Солнца и центром масс солнечной системы [6, 7]. Обсуждение этой связи дано ниже.

*Связь продолжительности минимумов солнечной активности с максимальным числом  $R_z$ .* Примем за продолжительность минимума солнечной активности период времени, когда среднегодовое число солнечных пятен  $R_z$  было меньше или равно 20,  $\Delta\tau_{\min}(R_z \leq 20)$ . Известно, что каждый новый 11-летний цикл солнечной активности начинается с образования пятен на высоких гелиоширотах  $\varphi \approx (25^\circ - 35^\circ)$ . В это же время существуют и пятна старого цикла, которые образуются на низких гелиоширотах  $\varphi \approx (8^\circ - 15^\circ)$ . В соответствии с законом Хейла биполярные группы пятен нового цикла имеют противоположные направления магнитных полей по сравнению с биполярными структурами пятен старого цикла. Какое-то время пятна нового цикла, образуемые на высоких гелиоширотах, и пятна старого цикла, образуемые на низких гелиоширотах, наблюдаются одновременно. Поэтому период минимума солнечной активности, определенный выше, включает в себя последние годы предыдущего цикла и первые годы нового цикла.

Нами были проанализированы солнечные циклы, начиная с 1700 г. по настоящее время. В табл. 2 приведены длительности минимумов солнечной активности, когда среднегодовые значения  $R_z \leq 20$ , и следующие за минимумами максимальные значения  $R_z$ .

Т а б л и ц а 2

Периоды минимума солнечной активности ( $R_z \leq 20$ ), длительности периодов минимумов, год максимума солнечной активности и величина  $R_{z\max}$ , временной интервал между годами максимума и минимума солнечной активности ( $\Delta\tau$ ) [2]

Годы минимума	$\Delta\tau_{\min} (R_z \leq 20)$ , годы	Год с $R_{z\max}$	$R_{z\max}$	$\Delta\tau$ , годы
1708–1714	7	1717	63	6
1723	1	1727	122	4
1732–1734	3	1738	111	5
1743–1745	3	1750	83.4	6
1754–1756	3	1761	85.9	6
1766	1	1769	106.1	3
1775–1776	1	1778	154.4	3
1784	1	1787	132	3
1796–1800	5	1804	47.5	6
1807–1814	8	1816	45.8	6
1820–1825	6	1830	70.9	7
1833–1834	2	1837	138.3	4
1843–1844	2	1848	124.7	5
1855–1856	2	1860	95.8	4
1866–1867	2	1870	139	3
1875–1879	5	1884	63.5	5
1887–1890	4	1893	85.1	5
1899–1902	4	1905	63.5	4
1910–1914	5	1917	103.9	4
1922–1924	3	1928	77.8	4
1932–1934	3	1937	114.4	5
1943–1944	2	1947	151.6	4
1953–1954	2	1957	190.2	3
1964–1965	2	1969	105.5	4
1975–1976	2	1980	154.6	3
1985–1986	2	1989	157.6	3
1995–1996	2	2000	119.6	4
2006–2010	5	2011		

Из данных табл. 2 можно найти связь между длительностью минимума солнечной активности  $\Delta\tau_{\min}$  ( $R_z \leq 20$ ) и интервалом времени между минимумом и максимумом солнечной активности  $\Delta\tau$  (рис. 2).

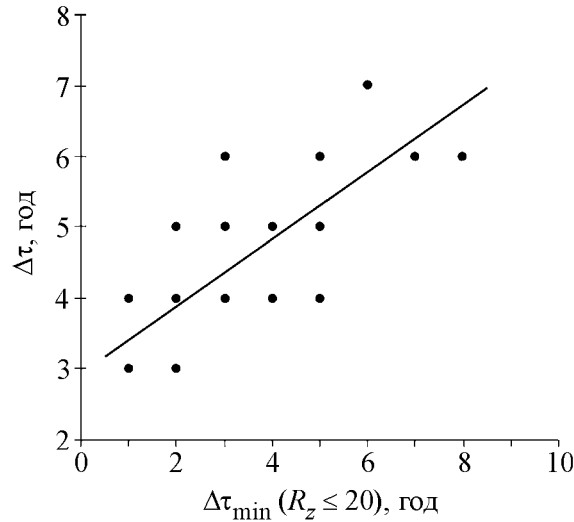


Рис. 2: Зависимость между длительностью минимума солнечной активности  $\Delta\tau_{\min}(R_z \leq 20)$  и интервалом времени между минимумом и последующим максимумом солнечной активности  $\Delta\tau$  (темные точки). Прямая проведена методом наименьших квадратов.  $\Delta\tau = 0.470 \cdot \Delta\tau_{\min} + 2.943$ . Коэффициент корреляции равен  $r = 0.72 \pm 0.12$ .

На рис. 3 приведена зависимость между величинами  $\Delta\tau_{\min}$  ( $R_z \leq 20$ ) и  $R_{z\max}$ , взятыми из табл. 2. Эта зависимость имеет вид  $R_{z\max} = 168.6 \cdot \exp(-0.16\Delta\tau_{\min})$  с коэффициентом корреляции  $r = 0.80 \pm 0.08$ .

Используя приведенные выше зависимости, можно найти ожидаемое значение  $R_{z\max}$  и год, когда должен наступить максимум солнечной активности в 24-ом солнечном цикле: среднегодовая величина  $R_{z\max} \approx 75$  ожидается в (2012–2013) гг.

О связи длительных минимумов солнечной активности с расстоянием между центром Солнца и центром масс солнечной системы. На рис. 4 показан расчет зависимости от времени расстояния  $\rho$  между центром масс солнечной системы и центром Солнца.

Как видно из рис. 4, длительные периоды низкой солнечной активности (показаны горизонтальными отрезками и обозначены буквами согласно табл. 1) наблюдаются тогда, когда расстояние  $\rho$  между центром Солнца и центром масс солнечной системы

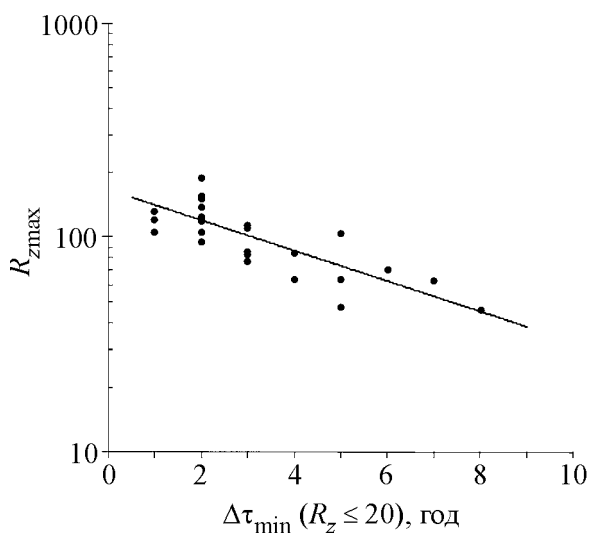


Рис. 3: Зависимость между длительностью минимума солнечной активности  $\Delta\tau_{\min}$  ( $R_z \leq 20$ ) и максимумом солнечной активности  $R_{z\max}$ . Прямая проведена методом наименьших квадратов.

достигает экстремумов (максимальных и минимальных значений  $\rho$ ). Исключением является минимум Оорта ( $\sim 1050$  г.), который согласно данной схеме должен был быть  $\sim$  в 1100–1150 гг. Вполне возможно, что восстановленные данные по солнечной активности за период 1000-летней давности содержат в себе неточности.

Буквой  $N$  обозначен новый длительный период низкой солнечной активности, который начался в 2006 г. и будет продолжаться еще несколько десятилетий [5–7]. Следующий за современным минимумом солнечной активности длительный период с низкими значениями  $R_z$  будет наблюдаться во второй половине 22-го века.

*Прогноз солнечной активности на ближайшие годы.* Возможное развитие текущего длительного минимума солнечной активности будет проходить по сценарию минимума Дальтона (1790–1835). В 2008 г. в работе [5] был дан прогноз развития цикла солнечной активности на ближайшие 11 лет. В данной работе на рис. 5 дается прогноз развития солнечной активности до  $\sim 2045$  г. На этом же рисунке показаны среднегодовые значения числа солнечных пятен  $R_z$  в предыдущем 23-ем цикле солнечной активности и значения  $R_z$ , полученные за последние 5 лет в текущем 24-ом цикле. Наблюдается вполне удовлетворительное согласие наблюдательных данных с прогнозируемыми величинами.

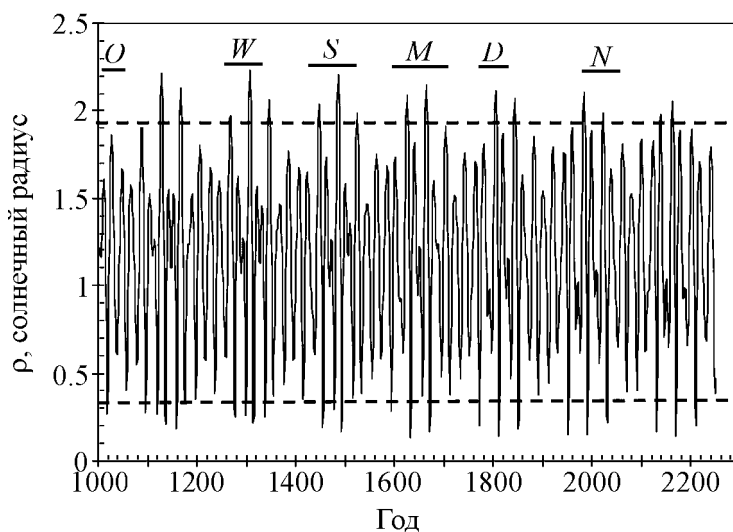


Рис. 4: Рассчитанные зависимости от времени расстояния  $\rho$  между центром масс солнечной системы и центром Солнца. Пунктирные прямые отделяют максимальные и минимальные значения  $\rho$ . Горизонтальные отрезки сверху показывают длительные периоды низкой солнечной активности согласно табл. 1: *O* – минимум Оорта ( $\sim 1050$ ), *W* – минимум Вольфа (1280–1340), *S* – минимум Шперера (1420–1530), *M* – минимум Маундера (1645–1715), *D* – минимум Дальтона (1790–1835), *N* – новый минимум (2005–2040?).

*Обсуждение результатов.* В предыдущем разделе было показано, что ожидается продолжительный период низкой солнечной активности. На возможность возникновения длительного периода низкой солнечной активности в начале 21-го века было указано в работах [8, 9]. Этот период будет продолжаться 2–3 солнечных цикла, каждый из которых будет иметь низкое значение  $R_{z\max}$ , равное 50–75.

В последние месяцы 2011 г. солнечная активность достигла одного из своих максимумов. Этот вывод подтверждается данными, представленными на рис. 6. В максимуме солнечной активности группы пятен располагаются в интервале гелиоширот  $\varphi = 13^\circ - 20^\circ$ . В конце 2011 г. средняя гелиоширота групп пятен равна  $\varphi \approx 17^\circ$ . В последующие два года величина  $\varphi$  будет уменьшаться до  $\varphi \approx 14^\circ$ . Вполне возможно, что при этом уровень солнечной активности будет флуктуировать около значения, наблюдаемого в настоящее время:  $R_{z\max} \approx (50 - 70)$ , число групп солнечных пятен будет равно  $\sim 6$  (рис. 6). Такое поведение солнечной активности наблюдалось в предшествующих (20–23) солнечных циклах. Существенное отличие настоящего цикла от предыду-

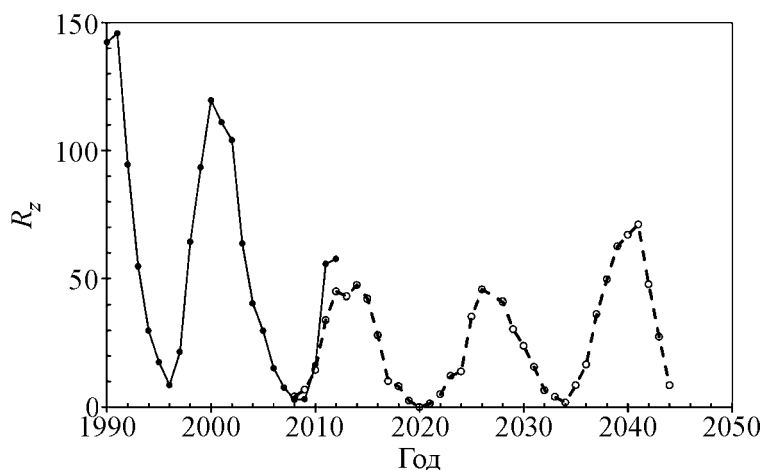


Рис. 5: Временная зависимость среднегодовых чисел солнечных пятен  $R_z$  в 23-ем и 24-ом циклах солнечной активности (сплошная кривая и темные точки) [7]. Пунктирная кривая и открытые кружки — прогноз солнечной активности до  $\sim 2045$  г. (см. также [7]).

щих состоит в том, что в 20–23 солнечных циклах уровень солнечной активности был в несколько раз выше, чем современный уровень.

Интересным является следующий факт. Известно, что в Маундеровском минимуме солнечной активности (1645–1715 гг.) температура на Земле снизилась на  $\sim 1^\circ\text{C}$  и имел место “малый ледниковый период” [4, 11]. Согласно прогнозу, сделанному в [12], в ближайшие десятилетия также ожидается глобальное похолодание климата на Земле, что совпадает с предстоящим длительным минимумом солнечной активности.

*Заключение.* Найдено, что длительные периоды низкой солнечной активности наблюдаются тогда, когда расстояние между центром Солнца и центром масс солнечной системы достигает экстремальных значений. В последнее десятилетие мы находимся в начале длительного периода низкой солнечной активности, наподобие минимума Дальтона. Продолжительность этого периода может составить несколько десятков лет (два-три 11-летних цикла солнечной активности). В этих циклах максимальное число солнечных пятен будет небольшим (среднегодовая величина  $R_z \approx 50 - 75$ ).

В ноябре-декабре 2011 г. солнечная активность достигла своего максимума (среднегодовое значение  $R_z \approx 60$ ). В феврале 2012 г. число солнечных пятен существенно снизилось ( $R_z \approx 35$ ). В течение последующих лет величина солнечной активности будет флуктуировать около значений  $R_z \approx 50$ .



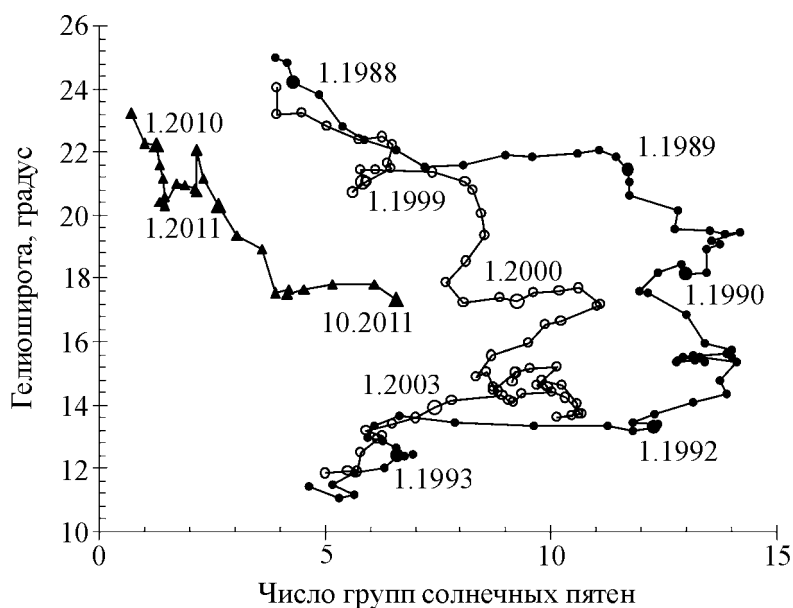


Рис. 6: Средняя гелиоширота групп солнечных пятен в зависимости от их числа в период начала цикла, фазы его максимума и в начале спада солнечной активности [10]. Показаны данные для 22-го солнечного цикла (сплошные кружки), для 23-го солнечного цикла (открытые кружки) и для текущего 24-го солнечного цикла (темные треугольники). Среднемесячные значения чисел групп солнечных пятен и их гелиоширот были сглажены по 5 точкам. Увеличенные значки соответствуют датам, показанным на рисунке.

Работа была поддержана грантами РФФИ (10-02-00326 и 10-02-10007-к) и программой Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика” (подпрограмма “Физика космических лучей”, проект “Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям”).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Douglas V. Vogt, Kenneth H. Shatten, *Solar Physics* **179**, No. 1, 189 (1998).
- [2] <http://sidc.oma.be/index.php3>; <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/index.html>
- [3] D.J. Shove, *J. of Geophys. Res.* **60**(2), 127 (1955).
- [4] John A. Eddy, *Scientific American* **236**(5), 80 (1977).

- [5] Y. Stozhkov, Modulation of the Cosmic Ray flux in the beginning of the 24-th solar activity cycle. *Proceedings of the International Symposium FORGES 2008, Yerevan, Armenia* (Yerevan Univ., Yerevan, 2009), стр. 12.
- [6] Ю. И. Стожков, В. И. Ермаков, В. П. Охлопков, Солнечная активность в настоящем и ближайшем будущем. Рабочее совещание “Циклы активности на Солнце и звёздах”, ГАИШ МГУ, 18-19 декабря 2009. Труды рабочего совещания (Санкт-Петербург, 2009), стр. 263.
- [7] В. П. Охлопков, Ю. И. Стожков, Изв. РАН, сер. физ. **75**(6), 911 (2011).
- [8] Б. П. Комитов, В. И. Кафтан, Геомагнетизм и аэрономия **43**(5), 592 (2003).
- [9] В. И. Козлов, Наука и техника в Якутии, № 1(10), 51 (2006).
- [10] <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtm>
- [11] [ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land\\_ocean.90S.90N.df\\_1901-2000mean.dat](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land_ocean.90S.90N.df_1901-2000mean.dat)
- [12] В. И. Ермаков, В. П. Охлопков, Ю. И. Стожков, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 41 (2006).

Поступила в редакцию 28 февраля 2012 г.